

光学学报

反射型法布里-珀罗腔和微环谐振腔级联的温度传感器

谢佳一¹, 苏国帅¹, 李明宇^{1*}, 何建军²

¹长春理工大学光电工程学院光学工程系, 吉林 长春 130022;

²浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 提出一种反射型法布里-珀罗(FP)标准具和微环谐振腔级联的温度传感器。该温度传感器由光纤反射镜、FP标准具和微环谐振腔构成。利用强度探测的方法,仿真计算和实验验证表明,温度传感器具有较高的灵敏度和较低的探测极限。将宽带光源和滤波器组合作为实验的输入光源,反射型FP标准具起到滤波的作用,温度传感元件是微环谐振腔。仿真计算得出该温度传感器的灵敏度为2.1406 dB/°C。实验结果表明,该温度传感器的灵敏度为1.9434 dB/°C,探测极限为0.01 °C。

关键词 传感器; 光纤反射镜; 法布里-珀罗标准具; 微环谐振腔; 强度探测; 灵敏度; 探测极限

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2328002

Temperature Sensor Cascading Reflective Fabry-Perot Cavity with Microring Resonator

Xie Jiayi¹, Su Guoshuai¹, Li Mingyu^{1*}, He JianJun²

¹Department of Optical Engineering, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract A temperature sensor cascading a reflective Fabry-Perot (FP) etalon with a microring resonator is proposed. This temperature sensor is composed of a fiber mirror, an FP etalon, and a microring resonator. The intensity interrogation method is employed, and both the simulation calculation and experimental verification results show that the proposed temperature sensor offers high sensitivity and a low detection limit. A combination of a broadband light source and a filter is used as the input light source for the experiment. The reflective FP etalon plays the role of a filter, and the temperature sensing element is the microring resonator. The sensitivity of the proposed temperature sensor yielded by the simulation calculation is 2.1406 dB/°C. The experimental results show that the sensitivity of the temperature sensor is 1.9434 dB/°C, and its detection limit is 0.01 °C.

Key words sensors; fiber mirror; Fabry-Perot etalon; microring resonator; intensity interrogation; sensitivity; detection limit

1 引言

21世纪是一个高度信息化的时代,光学技术科学顺应时代的要求迅猛发展,已经成为现代信息科技产业的强大支柱。光波导传感器因其尺寸小、成本低、工

艺易于制造、集成能力强和抗电磁干扰能力好等优点得到了广泛的研究。温度监测在许多领域中是非常重要的,如细胞培养、化学分析^[1]、石油与天然气勘探^[2]、环境监测和食品检测^[3]等。一些国内外学者利用基于光波导的温度传感器进行了一系列研究,并取得了相

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-06-01; 录用日期: 2022-06-16

基金项目: 吉林省自然科学基金(20220101130JC)、国家重点研发计划(2020YFC2004600)、国家自然科学基金(62027825)、高等学校学科创新引智计划(111计划D21009)

通信作者: *limingyu@cust.edu.cn

应的研究成果,如非对称马赫-曾德尔干涉仪结构的光波导温度传感器^[4]、基于等离子体波导的乙醇密封矩形腔纳米温度传感器^[5]和防谐振反射光波导湿度不敏感温度传感器^[6]等。2016年, Kim 和 Yu^[7]提出了一种级联双环温度传感器,并进行了波长探测。在该方案中,两个微环受温度影响,透射谱线在相同方向上以不同速度漂移,从而使得级联双环温度传感器透射谱线漂移速度受限,这种级联双环传感器相对单个微环谐振腔传感器来说灵敏度提升较低。

为了降低探测成本并提高传感器的灵敏度,本文提出了一种反射型法布里-珀罗(FP)标准具和微环谐振腔级联的温度传感器,这种温度传感器利用了光波导硅材料的热光效应。光纤反射镜(OFM)与FP标准具级联组成反射型FP标准具,增大了FP标准具干涉光谱的对比度,进而增大了级联透射光谱的对比度。FP标准具与微环谐振腔(MRR)级联,宽带光源(BLS)和滤波器组合作为实验的输入光源,并通过环形器与FP标准具和MRR相联。OFM使经过FP标准具的入射光被反射并再次经过FP标准具,然后进入温度传感元件MRR中,MRR光学芯片被固定在半导体制冷器(TEC)上。将传感结构的输出与功率探测器相连,实验通过强度探测得出该温度传感器的灵敏度为1.9434 dB/°C,探测极限为0.01°C。所提传感器通过增大级联输出光谱对比度增大了强度探测灵敏度。只需探测输出光强,无需测试光谱信息,降低了探

测成本。

2 基本原理

反射型FP标准具和MRR级联的温度传感器强度探测装置示意图如图1所示。传感器由三个主要部分构成,即OFM、FP标准具和MRR。组合输入光源连接偏振控制器并通过环形器后进入FP标准具中,经过OFM反射后再次通过FP标准具,环形器的端口3连接一分二的光纤耦合器。从FP标准具输出的光被分为两路:一路直接进入功率探测器(Aglient N7748A)中;另一路连接光纤阵列,利用光栅耦合的方式通过MRR后进入到功率探测器中。其中,光纤阵列与MRR光学芯片通过紫外胶固化后可形成稳定连接。直接进入功率探测器的那端被称为参考端,其输出光功率为参考光功率,参考端的存在可以消除光源输出功率变化对整个温度传感器探测装置的影响。另一端为探测端,因为其经过了温度传感元件MRR,所以其输出光功率为探测光功率。在不同温度下,记录探测光功率与参考光功率的比值就能得到温度传感器受温度影响的输出功率变化曲线。FP标准具的腔长为1.5 mm,腔内介质为空气。组成MRR的光波导的宽度为550 nm,高度为220 nm,芯层材料为Si,包层材料为SiO₂,环形波导半径为123 μm。OFM反射无偏振旋转,传感器传输TM₀₀(横磁)模式。

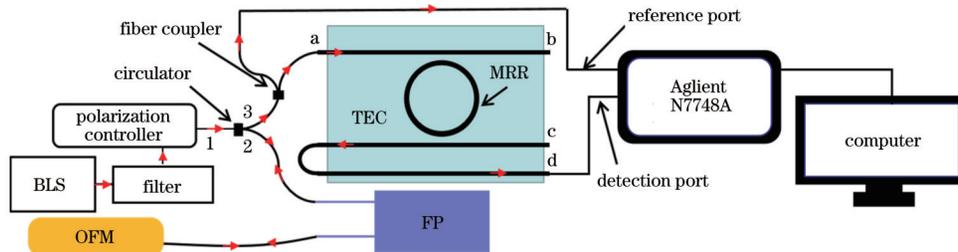


图1 温度传感器强度探测装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intensity interrogation device based on temperature sensor

基于传输矩阵方法(TMM)^[8-10],MRR d端口的输出光谱 T_d 的表达式为

$$T_d = \left\{ \frac{-k_1 k_2 \exp[-j(\beta - j\alpha_R)2\pi R]}{1 - t_1 t_2 \exp[-j(\beta - j\alpha_R)2\pi R]} \right\}^2, \quad (1)$$

式中: t_1 和 t_2 分别为MRR上下两个耦合区域的振幅透射系数; k_1 和 k_2 分别为MRR上下两个耦合区域的振幅耦合系数; β 为组成MRR的波导的传播常数; α_R 为MRR的损耗; R 为MRR环形波导的半径。

根据干涉公式,级联OFM的FP标准具的输出干涉光谱 T_e 可以表示为

$$T_e = \left(\frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{2\pi n h}{\lambda}} \right)^2, \quad (2)$$

式中: F 为FP标准具干涉谱线的精细度系数; n 为FP

标准具腔内介质的折射率; h 为FP标准具的腔长; λ 为输入光的波长。由式(2)可知:级联OFM起到增大FP标准具的输出干涉光谱Q值的作用,可提高输出光谱对比度;当温度发生改变时,光谱的对比度会发生较大变化,导致宽带光源光谱和传感器输出光谱重叠部分的积分功率值变化量加大,从而可提高强度探测下的灵敏度。由于OFM的反射率较高,接近为1,因此OFM的反射损失可以忽略。

总传输系数 T_f 的定义为

$$T_f = T_d \times T_e. \quad (3)$$

3 仿真计算

当使用强度探测方法时,参考端和探测端对应的输出功率 P_1 和 P_2 分别为

$$P_1 = \frac{1}{2} \int P_{\text{Input}}(\lambda) \times T_e d\lambda, \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} \int P_{\text{Input}}(\lambda) \times T_f d\lambda, \quad (5)$$

式中: P_{Input} 为光源的输入光谱。

将 P_1 和 P_2 的比值 P_2/P_1 作为传感信号, 可减小光源不稳定性对因温度变化导致的 MRR 有效折射率变化的光功率变化信号的影响^[11-12]。利用 P_2/P_1 线性变化的部分, 可对温度变化进行检测, 进而获取温度传感器的灵敏度。仿真得到, 当 MRR 光波导的宽度为 550 nm、高度为 220 nm 时, MRR 的有效折射率 n_{eff} 变化 (Δn_{eff}) 随温度 T 的变化 (ΔT) 为: $\Delta n_{\text{eff}}/\Delta T = 0.0002 \text{ RIU}/^\circ\text{C}$, 其中 RIU 为折射率单位。

图 2 所示为温度传感器强度探测方法的原理。图

2(a)、(c)中的虚线为宽带光源的输入光谱, 图 2(a)中的实线为初始探测温度 ($\Delta T=0$) 下的透射谱线 T_f 。强度探测下温度传感器的输出光谱为宽带光源输出光谱与 T_f 的乘积, 如图 2(b) 所示。图 2(c) 中实线为探测温度升高 ($\Delta T>0$) 时的透射谱线 T_f , 此时温度传感器的输出光谱如图 2(d) 所示。当探测温度逐渐升高或减小时, 透射谱线 T_f 会发生相应漂移。根据游标效应^[10-16], 因为温度传感器中温度传感元件 MRR 的自由光谱范围小于 FP 标准具的自由光谱范围, 所以当温度升高时, 透射谱线 T_f 会向左漂移。由图 2(b)、(d) 可知, 当温度变化时, 传感器输出的光功率值也会发生变化。

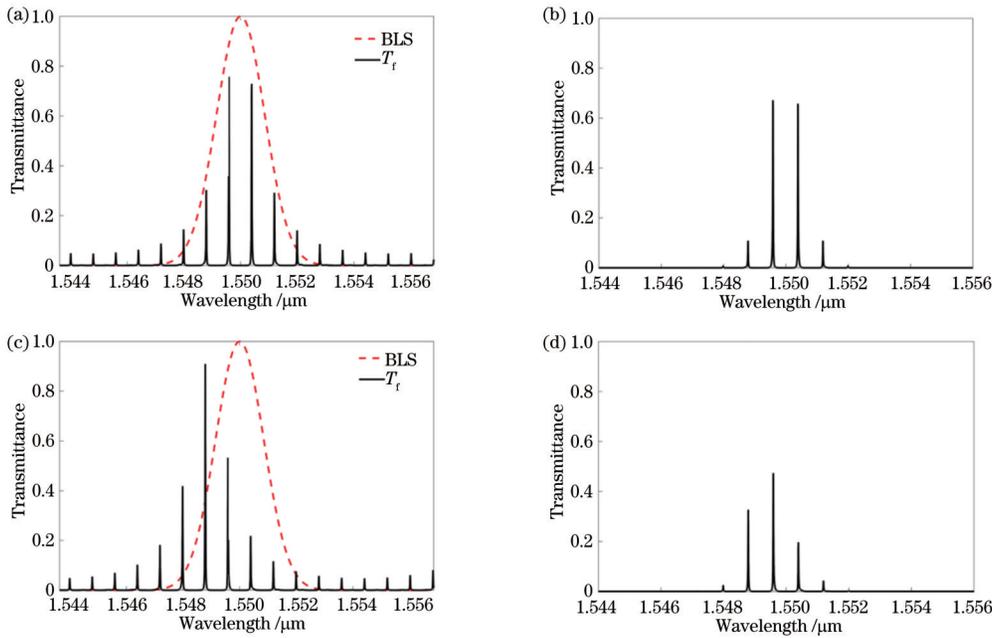


图 2 温度传感器强度探测方法的原理。(a) 当 $\Delta T=0$ 时, BLS 的输入光谱和透射谱线; (b) 当 $\Delta T=0$ 时, 温度传感器的输出光谱; (c) 当 $\Delta T>0$ 时, BLS 的输入光谱和透射谱线; (d) 当 $\Delta T>0$ 时, 温度传感器的输出光谱
Fig. 2 Principle of intensity interrogation method based on temperature sensor. (a) Input spectrum of BLS and transmission spectrum at $\Delta T=0$; (b) output spectrum of temperature sensor at $\Delta T=0$; (c) input spectrum of BLS and transmission spectrum at $\Delta T>0$; (d) output spectrum of temperature sensor at $\Delta T>0$

图 3 所示为温度传感器强度探测方法的功率比与温度变化的关系。温度每增加 1°C , 会导致 MRR 波导芯层折射率增加 0.00018, 有效折射率增加 0.0002。其中, 实线展示了 P_2/P_1 随 MRR 的有效折射率 n_{eff} 变化的关系。由图 3 可知, 曲线斜率最大的灵敏度为 $2.1406 \text{ dB}/^\circ\text{C}$, 探测范围 (DR) 约为 2°C 。仿真时所用的组合光源是半峰全宽 (FWHM) 为 4.5 nm 的高斯光源。仿真和实验相一致, MRR 的半径为 $R=123 \mu\text{m}$, FP 标准具的腔长为 $h=1.5 \text{ mm}$ 。

强度探测灵敏度 S_{max} 的表达式为

$$S_{\text{max}} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta T} \cdot \max \left[\frac{\Delta(P_2/P_1)}{\Delta n_{\text{eff}}} \right], \quad (6)$$

式中: $\Delta(P_2/P_1)$ 为比值 P_2/P_1 的变化量; $\max(\cdot)$ 为取最大值函数。

FP 标准具和 MRR 自由光谱范围之差会对灵敏度

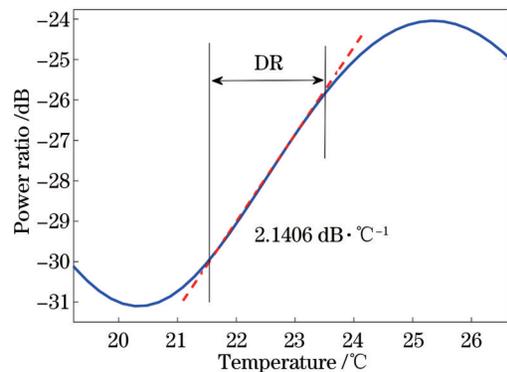


图 3 强度探测方法的输出光功率比与温度变化的关系
Fig. 3 Relationship between output power ratio of intensity interrogation method and temperature change

产生影响。如图 4 所示,当二者差值分别为 25、37、40 pm 时,对应的灵敏度为 $S_1=2.2112 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 、 $S_2=1.8612 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 、 $S_3=1.5206 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 。可以看出,当 FP 标准具和 MRR 自由光谱范围之差越小时,得到的灵敏度也就越高。因此,可以设计 FP 标准具和 MRR 的腔长,来使它们的自由光谱范围接近,进而获得更高的灵敏度。

4 实验验证

温度传感器实验装置图和 MRR 光学显微镜图如图 5 所示。图 5(a)为温度传感器实验装置图。图 5(b)为温度传感器实验装置的主体部分,其中 OFM、FP 标准具、MRR 光学芯片和 TEC 均在图中标出,OFM 的中心波长为 1550 nm,与 BLS 的中心波长相同,且在 $-5\sim 70^\circ\text{C}$ 温度范围内均能正常工作。因为 FP 标准具具有密闭的金属封装外壳,所以干涉光谱具有很好的稳定性。所用 MRR 的显微镜图如图 5(c)所示。

图 6 为测得的温度传感器的透射光谱和组合输入光源的光谱。图 6 中实线和虚线分别为温度在 24°C 和 25°C 时的透射光谱 T_i 。与仿真结果相同,当温度升高

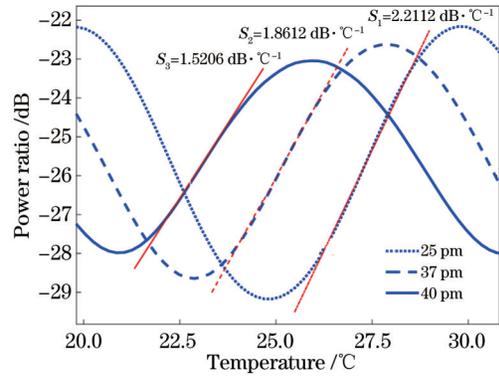


图 4 不同 FP 标准具和 MRR 自由光谱范围之差下输出光功率比随温度的变化

Fig. 4 Output power ratio varying with temperature under different differences between FP etalon free spectral range and MRR free spectral range

时,透射光谱 T_i 向左漂移。图 6 中点划线为宽带光源和滤波器组成的组合光源的光谱,综合考虑探测灵敏度和输出功率值^[17],确定了半峰全宽为 4.5 nm。

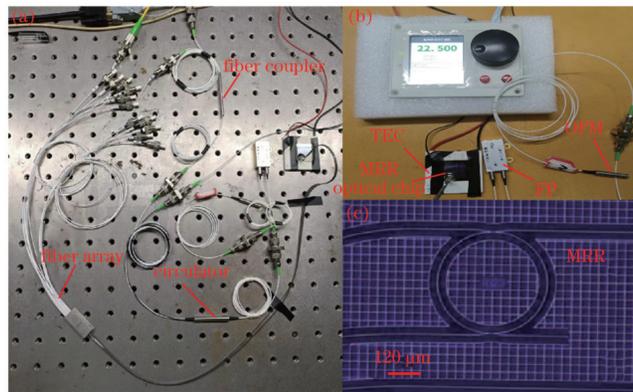


图 5 温度传感器实验装置图和 MRR 光学显微镜图。(a)温度传感器实验装置图;(b)温度传感器实验装置的主体部分;(c) MRR 的显微镜图

Fig. 5 Experimental setup for temperature sensor and optical microscope diagram of MRR. (a) Experimental setup for temperature sensor; (b) main part of experimental setup for temperature sensor; (c) optical microscope diagram of MRR

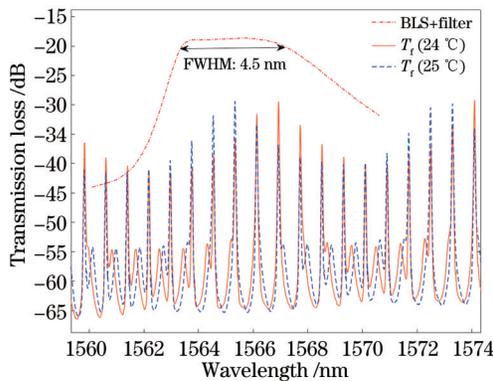


图 6 温度传感器的透射光谱和组合光源的光谱

Fig. 6 Transmission spectrum of temperature sensor and spectrum of combined light source

图 7 给出了温度传感器强度探测的数据点和拟合曲线。在电脑软件上调控 TEC 的温度,从 20°C 开始,

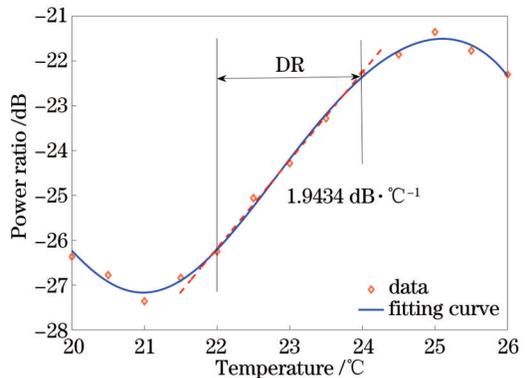


图 7 强度探测数据点和拟合曲线

Fig. 7 Data points of intensity interrogation and fitting curve

以 0.5 °C 为温度间隔进行升温,直至 26 °C,共计获得 13 个数据点。图 7 中菱形标记为三次重复实验取平均值得到的数据点,实线为数据点拟合得到的曲线。从图 7 中虚线的斜率可知,灵敏度为 1.9434 dB/°C,实验

得到的变化趋势近似为直线的数据点部分可以确定 DR,此时 DR 约为 2 °C。另外,将三次实验测得各温度下 P_2/P_1 的值和方差列于表 1 中。

表 1 三次实验探测到的 P_2/P_1 的值和方差
Table 1 Values and variances of P_2/P_1 detected in three experiments

Temperature /°C	P_2/P_1 in 1st experiment / dB	P_2/P_1 in 2nd experiment / dB	P_2/P_1 in 3rd experiment / dB	Variance / (10 ⁻⁵ dB)
20.0	-26.368	-26.372	-26.363	1.4
20.5	-26.785	-26.779	-26.767	5.6
21.0	-27.359	-27.351	-27.372	7.5
21.5	-26.824	-26.832	-26.857	19.6
22.0	-26.241	-26.250	-26.263	8.2
22.5	-25.051	-25.056	-25.074	9.7
23.0	-24.320	-24.306	-24.331	5.0
23.5	-23.295	-23.289	-23.253	13.8
24.0	-22.284	-22.287	-24.267	4.2
24.5	-21.847	-21.860	-21.858	3.3
25.0	-21.353	-21.358	-21.347	2.0
25.5	-21.770	-21.761	-21.780	6.0
26.0	-22.310	-22.290	-22.306	7.5

此外,还研究了所提传感器的稳定性。图 8 为温度为 26 °C 时传感器 P_2/P_1 的值随时间的变化关系。可以发现,在 1200 s 内, P_2/P_1 数值的变化量没有超过

0.03 dB,其值约为图 7 中相邻探测数据点最小变化量的 1/20。因此,所提温度传感器具有较高的稳定性。

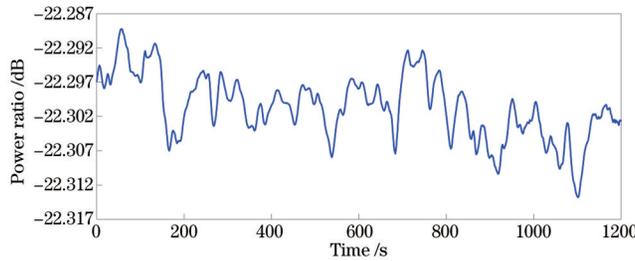


图 8 温度为 26 °C 时 P_2/P_1 值随时间的变化关系
Fig. 8 P_2/P_1 value varying with time at temperature of 26 °C

探测极限 M_{DL} 为

$$M_{DL} = \frac{3\delta}{S_{max}}, \quad (7)$$

式中: δ 为标准差,其值和功率探测器的灵敏度有关。提高功率探测器的灵敏度和传感器的灵敏度都能降低探测极限。为了求取 δ 的值,实验对 20 °C 下 P_2/P_1 的值进行了 5 次探测,最后得到 $\delta=0.0065$ dB。相关数据如表 2 所示。

由表 2 可以得出,反射型 FP 标准具和 MRR 级联的温度传感器在功率探测模式下的温度变化探测极限为 0.01 °C。

5 结 论

研究了由 OFM、FP 标准具和 MRR 组成的温度传感器在强度探测下的灵敏度和探测极限。实验测得,

表 2 温度为 20 °C 时 5 次实验探测到的 P_2/P_1 值
Table 2 P_2/P_1 values detected in five experiments at temperature of 20 °C

Experiment No.	1	2	3	4	5
P_2/P_1 /dB	-26.368	-26.372	-26.363	-26.359	-26.375

所提传感器的灵敏度为 1.9434 dB/°C,探测极限为 0.01 °C。该传感器不仅具有体积小的优势,相较于目前应用较多的基于光波导的温度传感器的波长探测方式还具有成本低、时间稳定性好和实用价值较高的优势。此外,保持传感器的结构和探测方式不变,设计 MRR 和 FP 标准具的腔长可使得二者的自由光谱范围相等,此时可进一步提高灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Potyrai R A, Hobbs S E, Hieftje G M. Optical waveguide sensors in analytical chemistry: today's instrumentation, applications and trends for future development[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1998, 362(4): 349-373.
- [2] Rong Q Z, Qiao X G. FBG for oil and gas exploration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2502-2515.
- [3] Székács A, Adányi N, Székács I, et al. Optical waveguide light-mode spectroscopy immunosensors for environmental monitoring[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): B151-B158.
- [4] Zhang Y, Zou J, He J J. Temperature sensor with enhanced sensitivity based on silicon Mach-Zehnder interferometer with waveguide group index engineering[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26057-26064.
- [5] Wu T S, Liu Y M, Yu Z Y, et al. A nanometric temperature sensor based on plasmonic waveguide with an ethanol-sealed rectangular cavity[J]. *Optics Communications*, 2015, 339: 1-6.
- [6] Liu S Q, Ji Y K, Cui L G, et al. Humidity-insensitive temperature sensor based on a quartz capillary anti-resonant reflection optical waveguide[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18929-18939.
- [7] Kim H T, Yu M. Cascaded ring resonator-based temperature sensor with simultaneously enhanced sensitivity and range[J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9501-9510.
- [8] 马春生, 刘式墉. 光波导模式理论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2006.
Ma C S, Liu S Y. Optical waveguide mode theory[M]. Changchun: Jilin University Press, 2006.
- [9] 岳永恒. 基于微环谐振腔的光波导传感器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 22-28.
Yue Y H. Waveguide sensor based on microring resonators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 22-28.
- [10] 谢臻益. 基于分子印迹膜的级联微环谐振腔生物传感器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 16-24.
Xie Z Y. The study on cascaded micro-ring resonators biosensor based on molecularly imprinted polymers[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 16-24.
- [11] 倪金盛. 基于微环谐振器的光波导传感器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 20-26.
Ni J S. Optical waveguide sensor based on micro-ring resonator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 20-26.
- [12] Yang Z P, Wang Y L, Su C, et al. Thermo-optical tuning cascaded double ring sensor with large measurement range[J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5149.
- [13] Jin L, Li M Y, He J J. Analysis of wavelength and intensity interrogation methods in cascaded double-ring sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(12): 1994-2002.
- [14] 徐廷廷, 杨玉强, 杨文龙, 等. 基于 PDMS 膜封装空芯光纤的级联双腔温度传感器[J]. *光学学报*, 2022, 42(8): 0806004.
Xu T T, Yang Y Q, Yang W L, et al. Cascaded double-cavity temperature sensor based on hollow fibers encapsulated by PDMS membrane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(8): 0806004.
- [15] 刘福祿, 张钰民, 庄炜, 等. 基于游标效应和基底增敏的复合光纤结构温度传感器[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1506002.
Liu F L, Zhang Y M, Zhuang W, et al. Fiber temperature sensor with composite structure based on vernier effect and substrate sensitization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1506002.
- [16] 郝晋青, 韩丙辰. 基于游标效应的高灵敏度光纤耦合器折射率传感器[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0206002.
Hao J Q, Han B C. Ultrasensitive refractive index sensor based on optical fiber couplers assisted with vernier effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0206002.
- [17] 曹紫葳. 基于级联等环生物传感器在农药检测中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 24-28.
Cao Z W. Application of cascade isocyclic biosensors in pesticide detection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 24-28.